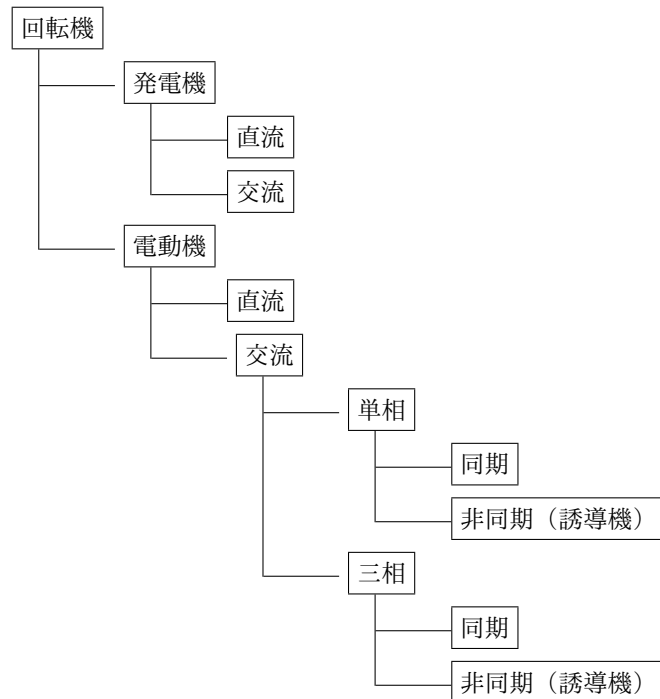


1 概論

電気エネルギーと電気および他のエネルギーとの変換を行う各種の機械器具.



2 直流発電機

2.1 直流発電機

- 電機子：磁束を切って起電力を誘導させる部分
- 界磁：電機子に通じる磁束を作る部分
- ブラシ：整流子と接して、誘導起電力を取り出す
- 整流子：ブラシに接して誘導起電力を整流して直流にする部分

2.1.1 電機子

電機子鉄心，電機子巻線，整流子で構成される。

2.1.2 電機子鉄心

界磁とともに磁気回路を作る部分。うず電流やヒステリシス現象による鉄損を生じる。

1. 成層鉄心：鉄損を少なくするため，けい素鋼板を積み重ねた成層鉄心を用いる
2. スロット：巻線を取めるための溝
3. 歯：スロットの間のこと

2.1.3 電機子巻線

電機子の巻線，一般に亀甲型コイルを使用する。

2.1.4 単相巻きと二層巻き

スロット内にひとつのコイル片を納める方法を単相巻き，スロット内に二つを二層巻き。

2.1.5 重ね巻と波巻

鼓状巻きでは，重ね巻と波巻の二つの方法がある。

■重ね巻

並列回路を作る。並列巻とも呼ばれる。

極数＝回路数

低電圧・大電流

■波巻

極数によらず二つの並列回路を作る。直列巻とも呼ばれる。

高電圧・定電流

2.1.6 整流子

常にブラシと接しているため，丈夫に作られる。整流子片と絶縁片が交互に組み合わされている。

2.1.7 ブラシ

ブラシは中性軸ごとにおく必要がある。重ね巻ではブラシ数と極数が等しい。

2.2 電機子反作用

磁束の流れに偏りができること。電機子反作用での軸ずれを考慮しない中性軸を幾何学的中性軸，考慮したものを電気的中性軸という。

2.2.1 主磁束

磁極の作る磁束

2.2.2 交さ起磁力

電機子だけに電流を流した場合

2.2.3 偏磁作用

主磁束と交さ起磁力を合わせたもの、これが電機子反作用。

2.2.4 補償巻線

電機子反作用対策のひとつ、電機子電流と逆方向に電流を流し、電機子の起電力を打ち消す。

2.3 誘導起電力

電機子導体一本に誘導される起電力の平均は

$$e = vBl \text{ [V]} \quad (2.1)$$

$$v = \pi Dn \text{ [m/s]} \quad (2.2)$$

$$e' = Bl\pi Dn \text{ [V]} \quad (2.3)$$

ブラシ間で得られる直流起電力 E は

$$E = \frac{Z}{a} \cdot e = \frac{Z}{a} \cdot p\phi n \text{ [V]} \quad (2.4)$$

ただし、

$$\left\{ \begin{array}{l} e : \text{誘導起電力の平均[V]} \\ v : \text{周速度[m/s]} \\ B : \text{ギャップの平均磁束密度[T]} \\ l : \text{コイル片の有効長さ[m]} \\ D : \text{電機子直径[m]} \\ n : \text{回転速度[rps]} \\ a : \text{並列回路数} \\ Z : \text{電機子巻線の全導体数} \\ p : \text{極数} \\ \phi : \text{1極から出る磁束[Wb]} \end{array} \right.$$

2.4 直流発電機の種類

主に他例発電機、分巻発電機、直巻発電機、マグネト発電機、複巻発電機がある。

この後，出てくるパラメータを下に示す．

$$\left\{ \begin{array}{l} V : \text{端子電圧[V]} \\ E : \text{起電力[V]} \\ R_a : \text{電機子巻線抵抗[\Omega]} \\ R_s : \text{界磁巻線抵抗[\Omega]} \\ I : \text{負荷電流[A]} \\ V_b : \text{ブラシの電圧降下[V]} \\ V_c : \text{電機子反作用による電圧降下[V]} \\ P : \text{出力[W]} \\ P' : \text{発生電力[VA]} \\ I_f : \text{界磁電流[A]} \\ R_f : \text{界磁抵抗[\Omega]} \end{array} \right.$$

2.4.1 他励発電機

磁界を発生させる界磁巻線の電源が別電源．

$$V = E - R_a I - (V_b + V_c) \text{ [V]} \quad (2.7)$$

$$P = V I \quad (2.8)$$

$$P' = E I \quad (2.9)$$

2.4.2 分巻発電機

自励発電機であり，界磁巻線が並列の発電機

$$V = E - R_a(I + I_f) - (V_b + V_c) [\text{V}] \quad (2.10)$$

$$P = VI \quad (2.11)$$

$$P' = E(I + I_f) \quad (2.12)$$

$$I_f = \frac{V}{R_f} [\text{A}] \quad (2.13)$$

2.4.3 直巻発電機

自励発電機であり，界磁巻線が直列の発電機

$$V = E - (R_a + R_s)I - (V_b + V_c) [\text{V}] \quad (2.14)$$

$$P = VI \quad (2.15)$$

$$P' = EI \quad (2.16)$$

2.4.4 複巻発電機

- 自励発電機であり，界磁巻線が分巻と直巻の発電機
- 和動複巻直流発電機：磁気を強め合う極性
- 差動複巻直流発電機：磁気を相殺し合う極性

2.4.5 マグネット発電機

- 永久磁石を用いた発電機

2.5 発電機の特性

- 無負荷飽和曲線：回転速度一定で無負荷状態の界磁電流と誘導起電力の関係を示す
- 外部特性曲線：負荷電流に対する端子電圧の関係を示す
- 無負荷飽和曲線は分巻も基本は同様.
- 直巻は「負荷電流＝界磁電流」のため、無負荷飽和曲線はない.

3 直流電動機

3.1 直流電動機

直流電動機は直流を入力とする電動機，構造は直流発電機と同じ．

3.2 逆起電力

発電機と同様に起電力が発生し，電機子電流を妨げるように働く．

(2.4)式と同じ

$$E = \frac{Z}{a} \cdot p\phi n = K \cdot \phi n [\text{V}] \quad (3.1)$$

この時，電機子電流 I_a は

$$I_a = \frac{V - E}{R_a} [\text{A}] \quad (3.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V : \text{端子電圧}[\text{V}] \\ E : \text{起電力}[\text{V}] \\ R_a : \text{電機子巻線抵抗}[\Omega] \\ I_a : \text{電機子電流}[\text{A}] \end{array} \right.$$

端子電圧と内部電圧降下との関係は(3.2)式を変形して

$$V = E + R_a \cdot I_a \text{ [V]} \quad (3.4)$$

3.3 速度

直流電動機の回転速度 n [rps]は逆起電力に比例し、1極あたりの磁束に反比例する。(3.1)式を変形して

$$n = \frac{E \cdot a}{p \cdot \phi \cdot Z} \text{ [rps]} \quad (3.5)$$

$$n = K \cdot \frac{E}{\phi} \text{ [rps]} \quad (3.6)$$

$$n = K \cdot \frac{V - (R_a \cdot I_a)}{\phi} \text{ [rpm]} \quad (3.7)$$

3.4 トルク

導体1本に加わる力 f は

$$f = Bl \cdot \frac{I_a}{a} \text{ [N]} \quad (3.8)$$

導体1本のトルク t は以下の式で求まる（電機子の半径を r とする）

$$t = f \cdot r = \frac{BlI_a r}{a} \text{ [Nm]} \quad (3.9)$$

ここで B は

$$B = \frac{\phi}{\frac{2\pi r l}{p}} = \frac{p\phi}{2\pi r l} \text{ [T]} \quad (3.10)$$

(3.9)式と(3.10)式より

$$t = \frac{p\phi I_a}{2\pi a} \text{ [Nm]} \quad (3.11)$$

最後に全導体数 Z をかけて全体のトルク T を出す

$$T = \frac{p\phi I_a}{2\pi a} \cdot Z = K_2 \cdot \phi I_a \text{ [Nm]} \quad (3.12)$$

3.5 出力

(3.4)の両端に I_a をかけると

$$VI_a = EI_a + R_a I_a^2 \text{ [W]} \quad (3.13)$$

機械的動力に変換される電力 P_m は

$$P_m = EI_a = 2\pi n T \text{ [W]} \quad (3.14)$$

電動機の出力は

$$P = P_m - (\text{鉄損} + \text{機械的諸損失}) \text{ [W]} \quad (3.15)$$

3.6 電圧変動率

電動機を定格電圧、定格出力で運転して、定格負荷から無負荷にした時の電圧変動の割合.

$$\epsilon = \frac{V_0 - V_n}{V_n} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (3.16)$$

$$\begin{cases} \epsilon : \text{電圧変動率[\%]} \\ V_0 : \text{無負荷電圧[V]} \\ V_n : \text{定格電圧[V]} \end{cases}$$

3.7 電機子反作用

電動機の電氣的中性軸は，発電機の反対方向へ移動する。

3.8 始動

- 静止状態の電動機を運転状態に移すこと。
- 始動器を用いることがある。

3.9 損失

- 一部のエネルギーは熱となって失われ，損失となる。
- 機械損，鉄損，銅損（抵抗損），浮遊負荷損など。

3.10 効率

- 実測効率と規約効率の二つ。
- 一般的には規約効率が用いられる。

$$\text{実測効率} = \frac{\text{出力}}{\text{入力}} \cdot 100 [\%] \quad (3.18)$$

$$\text{規約効率(発電機)} = \frac{\text{出力}}{\text{出力} + \text{損失}} \cdot 100 [\%] \quad (3.19)$$

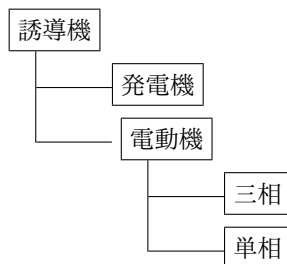
$$\text{規約効率(電動機)} = \frac{\text{入力} - \text{損失}}{\text{入力}} \cdot 100 [\%] \quad (3.20)$$

3.11 定格

- 出力の限度。
- その他定格速度，定格電圧，定格電流 etc.
- 定格には n をつけることがほとんど。 P_n , V_n etc.

4 誘導機

4.1 誘導機



- 固定子の作る回転磁界により，電気伝導体の回転子に誘導
- 電流が発生し，滑りに対応した回転トルクが発生．
- 堅牢，安価，取り扱いが容易．
- 一般に「誘導機→三相交流誘導電動機」
- 回転子導体の種類により，かご形と巻線形に分類．
- 交流電源の種類により，単相と三相に大別．

4.2 回転子導体の構造による分類

4.2.1 かご形誘導電動機

- トルク制御と励磁制御を分離したベクトル制御方式は，直流電動機のような速度制御が可能．
- 構造が簡単，堅牢，安価

4.2.2 巻線形誘導電動機

- スリップリングが接続されている．
- ブラシはスリップリングに接続されている．

4.3 回転磁界

- S・N極が中点もしくは，ある軸を中心に回転しているかのように極性が変化する磁界．

4.4 同期速度

$$n_s = \frac{f}{p} [\text{rps}] \quad (4.1)$$

$$N_s = \frac{2f}{P} \cdot 60 [\text{rpm}] \quad (4.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} n_s : \text{回転磁界の回転数}[\text{rps}] \\ N_s : \text{同期速度}[\text{rpm}] \\ f : \text{周波数}[\text{Hz}] \\ p : \text{対極数} \\ P : \text{極数}(= 2p) \end{array} \right.$$

4.5 すべり

- 相対速度と同期速度との比
- 相対速度は同期速度 N_s と実際の回転数 N との差

$$S = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (4.4)$$

$$N = N_s(1 - S) \text{ [rpm]} \quad (4.5)$$

$$\begin{cases} S : \text{すべり} \\ N_s : \text{同期速度[rpm]} \\ N : \text{実際の回転数[rpm]} \end{cases}$$

4.5.1 2次周波数

$$f_{2s} = S \cdot f_1 \text{ [Hz]} \quad (4.7)$$

4.5.2 一相の2次誘導起電力

$$E_{2s} = S \cdot E_2 \text{ [V]} \quad (4.8)$$

4.5.3 一相の1次誘導起電力

$$E_1 : E_{2s} = 1 : S \quad (4.9)$$

4.6 電力

$$\text{効率} \eta = \frac{P_m}{P_1} \quad (4.10)$$

$$\text{2次入力} : \text{2次出力} : \text{2次銅損} = 1 : 1 - S : S \quad (4.11)$$

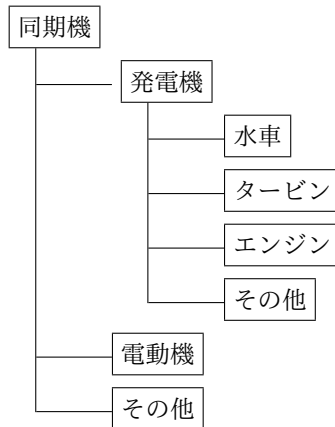
4.7 トルク

$$T = \frac{P_m}{\omega} \text{ [Nm]} \quad (4.12)$$

$$\omega = 2\pi N \text{ [rad/s]} \quad (4.13)$$

5 同期機

5.1 同期機



- 同期速度で回転する交流機.
- 同期発電機と同期電動機がある.
- 回転電機子形 → 電機子が回転子, 磁極が固定子
- 回転磁界形 → 電機子が固定子, 磁極が回転子

5.2 誘導起電力

$$E = 4.44 \cdot fkw\phi [\text{V}] \quad (5.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E : \text{誘導起電力} [\text{V}] \\ f : \text{周波数} [\text{Hz}] \\ k : \text{巻線係数} \\ w : \text{1相のコイルの巻き数} \\ \phi : \text{1極の平均磁束} [\text{Wb}] \end{array} \right.$$

5.3 2次電流

2次巻線の1相リアクタンスを sx_2 として

$$I_2 = \frac{E_2 s}{r_2 + jsx_2} [\text{A}] \quad (5.3)$$

5.4 単相

- 小型交流電動機のほとんどは単相誘導電動機
- 回転子がかご形
- くま取りコイル形電動機, くま取りコイル

5.5 始動法

- 三相では定格を直接入れるじか入れ始動などが使用される
- 単相では, 補助として始動巻線が必要.

5.6 特性曲線

- 無負荷飽和曲線，三相短絡曲線，負荷飽和曲線，外部特性曲線

5.6.1 無負荷飽和曲線

- 定格速度で回転させた時の無負荷時における界磁電流と発電機端子電圧の関係

5.6.2 三相短絡曲線

- 定格速度で回転中の発電機を三相短絡させたときの，界磁電流と電機子電流の関係を示すもの。

- I'_f ：定格電圧を発生させる界磁電流。
- I''_f ：三相短絡曲線の定格電流を流す界磁電流。

$$\text{短絡比 } K_s = \frac{I'_f}{I''_f} = \frac{I_s}{I_n} \quad (5.4)$$

5.7 同期インピーダンス

$$Z_s = \frac{V_n}{\frac{\sqrt{3}}{I_s}} [\Omega] \quad (5.5)$$

5.8 百分率同期インピーダンス

$$\%Z_s = \frac{Z_s I_n}{\frac{V_n}{\sqrt{3}}} \cdot 100 \quad (5.6)$$

$$= \frac{I''_f}{I'_f} \cdot 100 [\%] \quad (5.7)$$

5.9 定格電流

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3}V_n} [\text{A}] \quad (5.8)$$

5.10 三相短絡電流

$$I_s = \frac{V_n}{\sqrt{3}Z_s} [\text{A}] \quad (5.9)$$

5.11 同期速度

- 同期回転数.
- 定常運転時は同期回転数で回転.

$$f = pN_s \cdot \frac{1}{60} [\text{Hz}] \quad (5.10)$$

$$\begin{cases} f : \text{周波数}[\text{Hz}] \\ p : \text{対極数} \\ N_s : \text{同期速度}[\text{rpm}] \end{cases}$$

これを変形して

$$N_s = \frac{f}{p} \cdot 60 [\text{rpm}] \quad (5.12)$$

5.12 電圧変動率

$$\epsilon = (E_0 - V_n) \cdot 100 [\%] \quad (5.13)$$

$$\begin{cases} E_0 : \text{無負荷電圧}[\text{V}] \\ V_n : \text{定格の端子電圧}[\text{V}] \end{cases}$$

6 送配電

6.1 送電電圧

- 発電所で発電した電力は送電・配電線によって需要家に送られる.
- 送電電圧は高圧が6.6kVそのほかに特別高圧・超高圧（11～275kV），超々高圧（500kV）などが決められている.

6.2 送電の流れ

1. 発電された電圧は154～500kVに昇圧され，一次送電線（基幹送電線）で送電する.
2. 一次変電所から二次変電所や特別高圧需要家に送られる.
3. 二次送電線を介して，一般の事業所や工場，家庭などに配電される.

6.3 周波数

- 東日本 → 50Hz（ドイツ製）
- 西日本 → 60Hz（アメリカ製）
- 周波数変換所により，東西で融通できる

6.4 力率

- 以下，電圧実効値を V ，電流実効値を I ，有効電力を P .
- 皮相電力 $S = VI$
- 力率 $= P/S = \cos\phi$
- 有効電力 $P = VI\cos\phi$
- 位相差が生じる場合（主に誘導性負荷），力率改善のために進相コンデンサを挿入する.

6.5 三相回路

- 三相回路のO点は中性点と呼ばれ，0Vになる.
- Y形の接続をスター結線という.

- E_a, E_b, E_c → 相電圧
- V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} → 線間電圧

6.6 送電線

- 架空送電線と地中送電線がある。
- 電力が大きく、距離が大きいほど、高電圧で送電する方が線路損失が小さくなる。

6.6.1 架空送電線

- 送電用鉄塔，電力線，架空地線，がいしなどで構成。
- 電力線：鋼心アルミ撚り線が用いられる。
- がいし：電力線と送電鉄塔とを電氣的に絶縁する。
- 架空地線：落雷などによる電力線への雷撃を防ぐもの（接地されていて、送電には用いない）。

6.6.2 地中送電線

- 国内の都市や郊外で使用されるようになってきた。
- メリット：用地が少ない，美観，落雷の心配がない
- デメリット：建設費用が高い．送電容量が小さい．復旧に時間がかかる．
- ケーブル：OF（oil filled）ケーブル，CVケーブルが主に使われる。

6.7 変電所の機器

- 変電所には変圧器，開閉装置，保護装置，調相設備などがある。

6.7.1 変圧器

- 昇圧や降圧を行う。

6.7.2 開閉装置

- 遮断器と断路器を指す。
- 遮断器：電力系統から切り離す。
- 断路器：遮断器が切れている状態で各種機器と開閉する。

6.7.3 保護装置

- 主に避雷器を指す.
- 電力系統に発生する雷サージや開閉サージから保護する

6.7.4 GIS

- ガス絶縁開閉装置 (Gas Insulated Switchgear) の略
- 遮・断・避・開などを収納し, SF_6 ガスを充満した装置.

6.7.5 調相設備

- 負荷の力率改善や無効電力調整を行う.

6.8 配電システム

- 高圧配電線から柱上変圧器で低圧にして, 一般家庭へ配電.
- 線間電圧によって以下のように区分.
- 低圧 : 600V以下
- 高圧 : 7kV以上
- 特別高圧: それ以上

6.9 低圧配電系統

- 单相2線式: コンセント用 (100 or 200V)
- 单相3線式: 中性線入り (100 or 200V)
- 三相3線式: Δ 結線を用いた (200V)

6.10 負荷の特性

- 負荷曲線: 負荷の変動を時間的に表した曲線
- 需要率 : 最大需要電力の設備容量に対する比率

$$\text{負荷率} = \frac{\text{平均負荷電力}}{\text{最大負荷電力}} \cdot 100 [\%] \quad (6.1)$$

$$\text{需要率} = \frac{\text{最大需要電力}}{\text{設備容量}} \cdot 100 [\%] \quad (6.2)$$

6.11 電圧降下

- 受電端電圧 = 送電端電圧 - 電圧降下
- 国内では100Vは $101 \pm 6V$, 200Vは $202 \pm 20V$ の範囲内に維持されるように電圧制御が行われている.

6.12 力率調整

- 損失低減のために, 受電端に電力用コンデンサを挿入して, 負荷力率を改善する.

$$\text{基本料金} = (\text{契約基本料金}) \cdot \left(1 + \frac{85 - \text{力率}}{100}\right) \quad (6.3)$$

6.13 電力品質

- 気候で変動するエネルギーにより，電力品質の低下する．
- 電力品質のパラメータとして，高調波や瞬時電圧降下がある．
- 対策として，無停電電源装置（UPS）が有効

6.14 直流送電

- 交流への変換装置が必要 → 経済的に不利
- 遮断が難しい．
- 長距離大電力送電に適してる．
- 送電経路が「+」「-」だけのため，建設費が安価．
- 電圧降下や電力損失が少ない．

6.15 交流送電

- 変圧器が使える．
- 回転機のメンテナンスが容易．

6.16 交直変換所

- 交流と直流を変換する変換所
- 交直変換装置，サイリスタバルブなど

6.16.1 交直変換装置

- AC → DC：コンバータ
- DC → AC：インバータ

6.16.2 サイリスタバルブ

- 高電圧，大容量のサイリスタ素子を多数個組み合わせたもの．
- 整流器の役割．